

# 统计降尺度方法和 Delta 方法建立黄河源区气候情景的比较分析<sup>\* 1</sup>

赵芳芳 徐宗学

北京师范大学水科学研究院, 水沙科学教育部重点实验室, 北京, 100875

## 摘 要

大气环流模型(GCMs)预测的气候变化情景,必须经降尺度处理得出小尺度上未来气候变化的时空分布资料,才能满足气候变化对资源、环境和社会经济等影响进行评估的需要。文中研究同时应用 Delta 方法和统计降尺度(SDS)方法对黄河源区的日降水量和日最高、最低气温进行降尺度处理,建立起未来 3 个时期(2006—2035、2036—2065 和 2066—2095 年,简记为 2020s、2050s 和 2080s)的气候变化情景,并比较分析两种方法的优缺点和适用性。结果表明,未来降水量有一定的增加趋势,但是增幅不大,而日最高、最低气温存在明显的上升趋势,且增幅较大。与基准期相比,Delta 方法模拟的未来 3 个时期降水量将分别增加 8.75%、19.70%和 18.49%;日最高气温将分别升高 1.41、2.42 和 3.44 °C,同时,日最低气温将分别升高 1.49、2.68 和 3.76 °C,未来极值气温变幅减小。SDS 法借助站点实测数据和 NCEP 再分析资料建立 GCM 强迫条件下的降尺度模型,模拟结果表明,未来 3 个时期降水量将分别增加 3.47%、6.42%和 8.67%,季节变化明显;气温随时间推移增幅明显,未来 3 个时期的日最高气温将分别升高 1.34、2.60 和 3.90 °C,最低气温增幅相对较小,3 个时期将分别升高 0.87、1.49 和 2.27 °C,由此模拟的未来时期无霜期将延长。在降尺度方法的应用上,SDS 方法存在明显的优势,但同时也存在不可避免的缺陷。因此,在实际的气候变化影响评估中,需要多种方法综合比较,以期决策部门提供参考和依据。

**关键词:** 气候变化, 大气环流模型(GCMs), 情景, 降尺度, 黄河。

## 1 引 言

在区域气候影响模拟中,对政府决策影响最大的问题是缺少对应尺度的气候情景<sup>[1]</sup>。大气环流模型(GCMs)输出信息的空间分辨率较低(一般为 50,000 km<sup>2</sup>),缺少区域气候信息,因而其应用受到限制,很难对区域气候情景(如云量、地形等)做出精确的预测<sup>[2-8]</sup>。因此,目前发展了许多降尺度方法来弥补 GCMs 气候情景的不足,提高其时空分辨率<sup>[9]</sup>。Delta 方法是美国国家评价中心(见 <http://www.nacc.usgcrp.gov>)推荐应用的未来气候情景生成方法。应用 Delta 方法降尺度 GCMs 输出数据,以此模拟的气候变化为相对变化而不是绝对变化<sup>[10]</sup>。另一种方法是统计降尺度方法(SDS),应用 GCM

输出的大尺度气候变量(如平均海平面气压)估计区域的气象参数(如站点降水量和风速),即建立大尺度气候变量与区域尺度气候变量间的统计关系<sup>[11]</sup>。与 Delta 方法相比,统计降尺度方法产生的气候情景与 GCM 的有效性有关,而且应用统计降尺度必须保证未来气候强迫下选择的大尺度预报因子与所预报的预报量之间有很强的相关。另外,SDS 方法比较耗时,并且需要有足够的观测资料来建立统计模式<sup>[1-4,12]</sup>。由于各自存在的优缺点,因此,目前两种方法常用来相互比较和验证。

本文同时应用 Delta 和 SDS 方法对黄河源区的日降水量和最高、最低气温进行降尺度处理,建立未来 3 个时期 2020s(2006—2035 年)、2050s(2036—2065 年)和 2080s(2066—2095 年)的气候情景,并

\* 初稿时间:2006 年 2 月 23 日;修改稿时间:2006 年 7 月 8 日。

资助课题:北京师范大学“京师学者”特聘教授启动经费。

作者简介:赵芳芳,主要从事气候变化对水文资源的影响分析研究。E-mail: zhfang2003@126.com

比较分析两种方法的优缺点和适用性。

## 2 研究区概况

黄河源区是指唐乃亥水文站以上的流域,属青藏高原气候系统,冷季为青藏冷高压所控制,长达7个月,具有典型高原大陆性气候特征;暖季受西南季风的影响,产生热低压,水汽丰富,降水较多,形成高原亚热带半湿润季风气候。总的特征是冬长无夏,春秋相连,热量低,年温差小、日温差大,日照时间长,辐射强烈,风沙大,植物生长期短,绝大部分时间和地区无绝对无霜期。多年平均气温 $5-4.0^{\circ}\text{C}$ (其中5—9月平均气温超过 $0^{\circ}\text{C}$ ),年日照时数为2250—3131 h,空气含氧量为海平面的60%。多大风,平均风速3—4.5 m/s,最大风速18—28 m/s,17 m/s以上大风平均日数为70—140 d。多年平均降水量198.0—700.5 mm,由西北向东南递增,6—9月降水量占全年的75%。年蒸发量为800—1200 mm。

本文利用GIS提取了黄河源区7个气象站和16个雨量站(图1),这些站点分布均匀,能大体反映该区域的气候变化特征。黄河源区地形复杂,高程从东南部若尔盖站的3440 m到西北部玛多站的4272 m逐渐增高。充分考虑河源区的特殊地形条件将在降尺度过程中起到非常重要的作用。

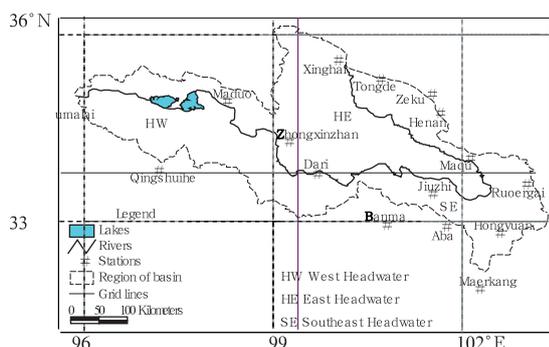


图1 HadCM3网格和黄河源区站点分布

Fig. 1 HadCM3 grid boxes and the gauging stations at the headwater catchment of the Yellow River basin

## 3 数据

统计降尺度需用3类数据:站点实测日数据、NCEP再分析资料和HadCM3 GCM模拟的当前和未来气候条件下的输出数据。黄河源区气象数据和

降水量数据来自中国气象局气象信息中心(该资料经过了初步的质量控制)。建立气候情景需要应用基于海平面气压和位势高度等大气环流要素的预报因子变量<sup>[13]</sup>,如大气稳定性、涡旋、散度、纬向和经向气流等<sup>[14]</sup>。加拿大气候影响和情景(CCIS)项目(<http://www.cics.uvic.ca/scenarios/sdsm/select.cgi>)提供了26个应用于统计降尺度的大尺度预报因子变量,这些变量是由CCIS应用GCM的日输出数据和NCEP再分析数据(经过网格再划分与GCM的网格尺度相匹配)转换而成<sup>[2,15]</sup>,分别描述大气环流、大气层厚度和地表、850 hPa及500 hPa高度的大气湿度状况<sup>[1]</sup>。另外,研究<sup>[16-17]</sup>指出,英国Hadley中心的海气耦合模式对东亚地区模拟效果较好,因此文中GCM模式采用HadCM3,该模型有3种气体排放情景,分别是控制情景、温室气体排放情景和温室气体+硫化物气溶胶排放情景<sup>[18]</sup>,本研究应用了最后一种排放情景。该模型的历史强迫数据是“真实”强迫的近似值,因此,“当前”气候条件下的GCM输出结果并不一定真正代表当前的气候条件。另外,由于实测气候与GCM强迫的不同,所以GCM模拟输出的年份与实际年份不完全一致。故本研究同时应用了NCEP再分析资料进行降尺度,即同时应用了站点实测数据和NCEP再分析资料来建立GCM强迫条件下的降尺度模型<sup>[10]</sup>。

应用的预报因子变量取自研究区内临近站点的HadCM3网格值。黄河源区覆盖3个与HadCM3相匹配的网格(图1),分别是HE、HW和SE。应用Delta方法和SDS方法分别建立每个网格的气候变化情景,然后借助Arc/View的Spline内插方法将离散网格的气候情景内插为区域的平均气候变化情景。

## 4 方法

### 4.1 Delta方法

Delta方法是一种比较简单但是很常用的方法,即比较每个GCM输出网格未来不同时期(2020s、2050s和2080s)年平均降水量与基准期(1961—1990年)年平均降水量,计算降水量的变化比例,将这些变化比例乘各个气象站基准期实测年平均降水量,得到各站未来不同时期年降水量的变化量,值得注意的是使用Delta法计算未来降水量时,处在同一个GCM输出网格内的气象站采用同一个变化比

例。再将区域内所有气象站未来不同时期的降水用 GIS 进行内插,即可得到未来不同时期各个区域的降水量。Delta 方法在计算温度的变化时,与降水不同的是 GCM 输出网格温度的变化选择温度的绝对变化量,将每个 GCM 输出网格未来不同时期 30 a 的逐月温度与基准期 GCM 模拟结果进行比较,得到各时期各个网格温度的变化量,将该变化量加到网格内各个气象站基准期平均的实测温度上<sup>[10]</sup>。

虽然该方法结合站点实测气候资料和 GCM 输出的平均气候变化建立起了相应的气候情景,但是该方法存在许多不可避免的局限性,如基准期实测数据和降尺度后的数据只是在相对平均值和最大值、最小值上存在差异,其他特征如极差和方差等都没有发生变化,并且该方法假定当前气候的空间分布在未来各个时期是不变的<sup>[1]</sup>。但是降尺度后的情景很好代表了 GCM 或 RCM(区域气候模式)的输出变化,且其应用比较简单,因此,Delta 方法仍然得到了较为广泛的应用。

#### 4.2 统计降尺度(SDS)方法

降尺度法是基于这样一种观点:区域气候变化情景是以大尺度(如大陆尺度甚至行星尺度)气候为条件的,它就是把大尺度、低分辨率的 GCMs 输出信息转化为区域尺度的地面气候变化信息(如气温、降水),从而弥补 GCMs 对区域气候预测的局限性<sup>[4]</sup>。模型的敏感性分析表明降尺度时存在许多敏感性因素,如季节的定义、数据标准化方法的选择、模型标定期的长度、函数形式和预报因子变量的选

取等<sup>[19]</sup>,同时还指出,即使应用同样的 GCM 预报因子变量,不同的环流机制和降尺度方法也会产生不同的区域气候变化情景<sup>[10,20]</sup>。另外,SDS 情景假定预报因子和预报量之间存在很强的相关,并且对选择的预报因子变量和降尺度应用的转换函数非常敏感<sup>[19-20]</sup>。

统计降尺度模型 SDSM(Statistical DownScaling Model)是一个基于 Windows 界面、研究区域和当地气候变化影响的决策支持工具,以 VB6.0 为编码基础,便于操作和应用。许多文献<sup>[2-3]</sup>已经对 SDSM 作了详细介绍。迄今为止,SDSM 降尺度方法已经广泛应用于遍布欧洲、北美和东南亚等地的气象、水文及环境评价等诸多领域<sup>[3]</sup>。

### 5 气候情景

#### 5.1 Delta 方法生成的气候情景

图 2 列出了由 Delta 方法生成的未来 3 个时期的日降水量变化比例和日最高、最低气温变化情景。由图 2a 可以看出,未来 3 个时期日降水量变化非常不均匀,表现在各个季节和各个月的变化也非常显著。未来 3 个时期春季和夏季各月的降水量变化不大,变化幅度基本上低于 20%,秋季 10 月和 11 月的降水量增幅也较小,而冬季 3 个月的降水量增幅均较大,尤其是 2050s 和 2080s,变化幅度均高于 50%。1、2、9 和 12 月降水量增幅比较明显,而 3 和 8 月降水量表现出了不同程度的减少趋势。总体来看,降水量随时间推移表现出一定的增加趋势,未来

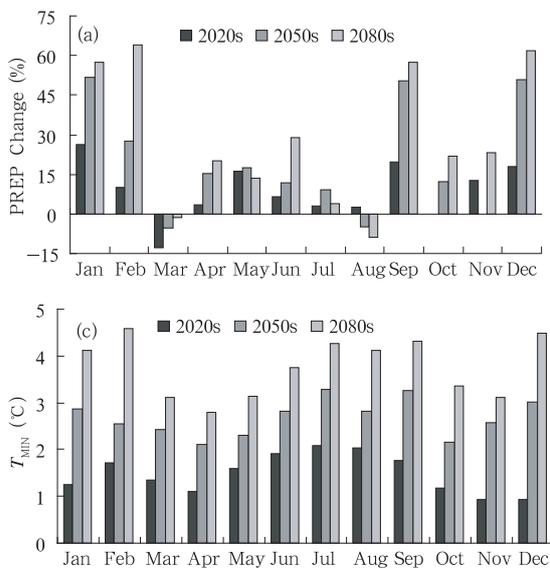


图 2 GCM(Delta 变化)输出的黄河源区月降水量(a)、最高气温(b)和最低气温(c)未来不同时期的变化  
 Fig. 2 Changes in monthly precipitation (a), maximum (b) and minimum temperature (c) in the 2020s, 2050s, and 2080s, for the headwater catchment of the Yellow River basin using GCM (Delta Change) outputs

3 个时期将分别在基准期基础上增加 8.75%、19.70% 和 18.49%。图 2b 和 2c 分别表示 Had-CM3 模拟的日最高、最低气温的变化情景。可以看出,日最高气温变化随时间推移增幅很快,2020s 比基准期(当前气候强迫 CCF)气温平均上升 1.41 °C,2050s 比 2020s 气温平均上升 1.01 °C,2080s 比 2050s 平均升高 1.02 °C,几乎平行的递增状况形成了如图 2b 所示的未来 3 个时期的气温变化情景。其中 3 个时期(2020s、2050s 和 2080s)的平均气温变化情景分别为 1.41、2.42 和 3.44 °C,表现在每个季节和每个月的变化情景虽各不相同,但变化幅度不大。与日最高气温的变化相比,图 2c 显示的日最低气温的变化也很明显,3 个时期的平均最低气温变化情景分别为 1.49、2.68 和 3.76 °C,夏季最低气温变化相对较显著。以上结论说明,无论对于哪种情景,黄河源区在未来若干年内的持续增温趋势是不可避免的,而降水量变化幅度较小,这必然导致未来水资源的紧张趋势进一步恶化。

## 5.2 统计降尺度情景

概括起来统计降尺度法包括以下 5 个重要环节:(1)大尺度气候预报因子的选择,即筛选预报因子变量;(2)统计降尺度模式的选择和标定;(3)利用

独立的观测资料检验模式;(4)把统计模式应用于 GCM 模式输出产生未来气候情景;(5)对未来气候情景进行诊断分析研究,包括对输出数据进行统计分析、模型输出制图等<sup>[2-4]</sup>。

### 5.2.1 筛选预报因子变量

遵循预报因子选择的 4 个标准<sup>[4]</sup>,应用 SDSM 程序中的“筛选变量”和偏相关分析从候选变量中筛选出适合对黄河源区日降水量和日最高、最低气温进行降尺度所用到的预报因子变量及其转换变量(表 1)。这些变量具有明确的物理意义,并且对变量的典型特征(如方差、干/湿日持续期、月降水量等)具有较小的残差。表 1 中同时列出了所用模型的类型,因气温与大尺度预报因子之间存在直接的联系,所以进行气温降尺度时模型为无条件(Unconditional)过程;而降水量与大尺度预报因子(如湿度和气压等)之间需要通过中间变量(一般为干/湿日发生概率)建立联系,所以降尺度降水量时模型为条件(Conditional)过程<sup>[2-3]</sup>。本研究中,首先模拟了干/湿日发生概率与大尺度环流因子间的统计关系。然后,假定发生了降水,在不同的预报因子条件下模拟了湿日天数,并假定降水量为指数分布,应用 Kilsby 等<sup>[21]</sup>提出的回归程序来模拟。

表 1 详细降尺度模型  
Table 1 Details of downscaling models

模型	日降水量	日最高气温	日最低气温
预报因子	比湿(shum)	平均海平面气压(mslp)	平均海平面气压(mslp)
	滞后 1 天的平均海平面气压(lagm)	地表纬向风速(p_u)	500 hPa 位势高度场(p500)
	500 hPa 高度的相对湿度(r500)	500 hPa 位势高度场(p500)	850 hPa 位势高度场(p850)
	地表涡度(p_z)	850 hPa 位势高度场(p850)	850 hPa 高度涡度(p8_z)
		850 hPa 高度纬向风速(p8_u)	2 m 高度的平均气温(temp)
		2 m 高度的平均气温(temp)	850 hPa 高度纬向风速(p8_u)
模型类型	日模型;反正态转换模型;条件过程	日模型;线性模型;无条件过程	日模型;线性模型;无条件过程

### 5.2.2 统计降尺度模式的选择和标定

模型标定算法给出了月回归模型的解释方差和标准误差。这些统计特征值反映了统计降尺度对评价未来气候变化的重要性。模型的标准误差反映预报量对环流因子的敏感性,而模型的解释方差百分率表示当地预报量与环流因子间的相关性大小。有人研究指出,模型标定期日气温(最高和最低)和比湿的解释方差一般高于 70%,日太阳辐射、日照时数、风速和相对湿度的解释方差为 40%—60%,而日降水的解释方差一般低于 40%。表 2 列出了模

型标定期黄河源区日降水量及日最高、最低气温的解释方差(E%)和标准误差(SE)。从表 2 可以看出,模型标定期区域环流因子(如平均海平面气压和 500 hPa 位势高度场等)可以很好的解释日最高气温的方差,其中 3 个网格的解释方差约为 50%,使得河源区统计降尺度模型对日最高气温的解释方差为 50.45%。但是,该模型对日最低气温方差的解释却相对较差,河源区仅有 27.51%的方差可以由区域环流因子做出很好的解释。同时,该模型对日降水量的解释方差较低,仅为 14.78%,这可能与降

水因子本身的特殊性质有关。与前人研究相比,该模型对气温和降水量模拟的解释方差均偏低,所以需要进一步深入分析河源区的特殊地形和气候条件,进一步研究 SDSM 模型的应用,针对存在问题做出一定的修正。另外,从模型的标准误差(表 2)可以看出,SDSM 模拟日降水量和日最高气温的标准误差较小,而对于日最低气温的模拟标准误差却相对较高。由此也可以看出,SDSM 模型对于日降水量和日最高气温的模拟效果相对较好。

表 2 模型标定期(1961—1975 年)的平均解释方差( $E\%$ )和标准误差( $E_s$ )

Table 2 Average percentages of explained variance ( $E\%$ ) and standard errors ( $E_s$ ) for the simulation period 1961—1975

	R		$T_{MAX}$		$T_{MIN}$	
	$E\%$	$E_s(\text{mm})$	$E\%$	$E_s(\text{C})$	$E\%$	$E_s(\text{C})$
HE	11.00	0.79	55.40	2.38	24.30	3.13
HW	25.30	0.61	49.15	2.64	31.10	3.54
SE	7.00	0.76	50.76	2.66	23.80	3.53
河源区	14.78	0.72	50.45	2.62	27.51	3.49

### 5.2.3 降尺度模式的独立验证

统计关系建立以后,还需要用独立的观测资料对该统计降尺度模式进行可靠性检验。本研究应用 1961—1975 年的数据标定 SDSM 模型,用 1976—1990 年的数据验证模型。Hanssen-Bauer 和 Forland 强调在经验模型参数率定期序列长度应超过 5 a,因此,本研究分别应用 15 a 的数据来标定和验证模型是恰当的。

图 3 比较了黄河源区验证期湿日发生概率和最大湿日/干日持续期(传统的天气发生器模型很难模拟最大持续期),图 4 比较了源区的日最高、最低气温序列。应用日实测值和表 1 中列出的预报因子变量建立了河源区的日降水量(lagm、p<sub>-z</sub>、shum)和日最高、最低气温(lagm、p<sub>500</sub>、p<sub>850</sub>、temp)降尺度模型。该模型应用了平均海平面气压滞后 1 d 的自回归转换变量,较好地模拟了湿日发生频率和最高、最低气温的季节循环特征(夏季最大,冬季最小)。由图 3a 可以看出,该模型对湿日发生概率估

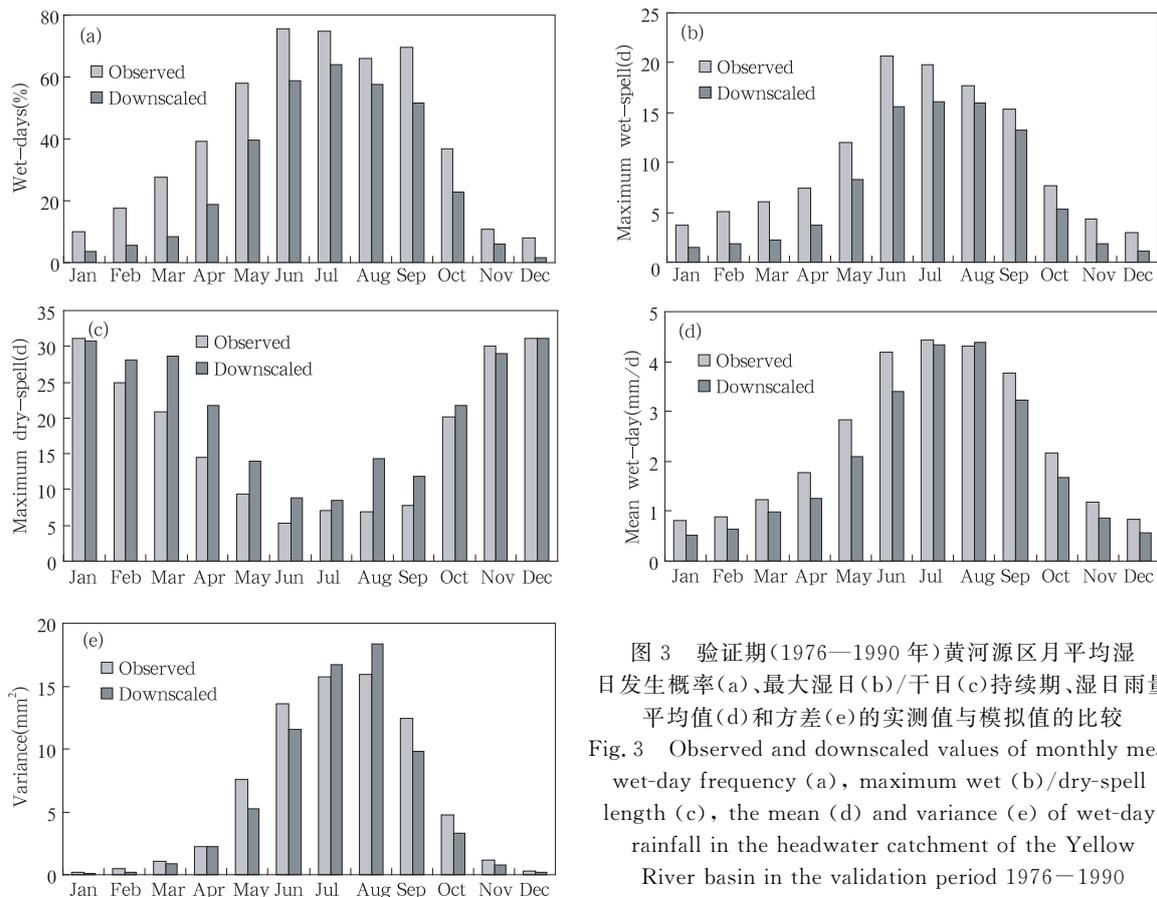


图 3 验证期(1976—1990 年)黄河源区月平均湿日发生概率(a)、最大湿日(b)/干日(c)持续期、湿日雨量平均值(d)和方差(e)的实测值与模拟值的比较

Fig. 3 Observed and downscaled values of monthly mean wet-day frequency (a), maximum wet (b)/dry-spell length (c), the mean (d) and variance (e) of wet-day rainfall in the headwater catchment of the Yellow River basin in the validation period 1976—1990

计不足,相应模拟的平均月最大湿日持续期(图 3b)比实际值偏低 3.0 d,而平均月最大干日持续期(图 3c)则比实际值偏高 3.3 d。该模型同时模拟了月平均降水量,把全球误差校正参数设为 1.0,峰度参数设定为 3(表示缩短了的剩余偏差)。在这种设置下该模型较好地模拟了平均降水量及其方差(图 3d、3e)。可以看出,夏季平均降水量及其方差均最大,更加确定了湿日发生频率的季节循环特征。另外,由图 4 可以看出,验证期内,黄河源区月平均日最高、最低气温的实测值和模拟值拟合的相当好。

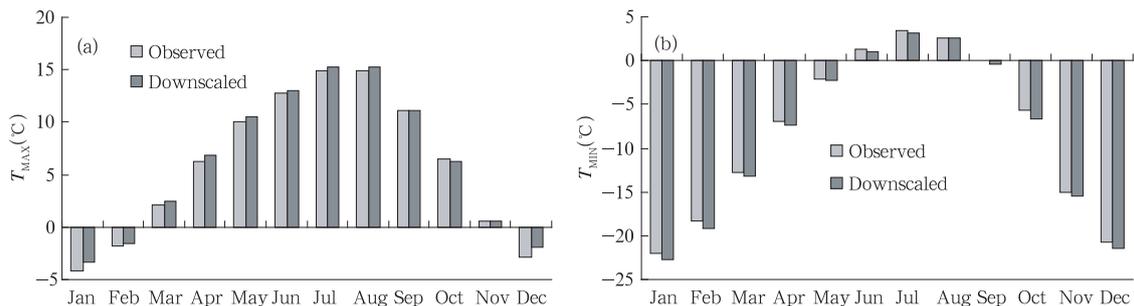


图 4 验证期(1976—1990 年)黄河源区月平均日最高气温(a)和最低气温(b)实测值与模拟值的比较

Fig. 4 Observed and downscaled monthly mean maximum (a) and minimum (b) temperatures in the headwater catchment of the Yellow River basin in the validation period 1976—1990

表 3 黄河源区 1976—1990 年日降水量和日最高、最低气温统计特征值模拟结果评价

Table 3 Assessment on statistic characters of the simulated daily precipitation, maximum and minimum temperatures

统计值	月平均降水量(mm/d)	湿日发生概率(%)	最大干日持续期(d)	最大湿日持续期(d)	月降水量方差(mm <sup>2</sup> )	日最高气温(°C)	日最低气温(°C)
实测值	3.22	41.22	76.83	32.26	11.52	5.92	-7.97
模拟值	3.19	28.32	84.10	22.64	12.51	6.24	-8.44
偏差	-0.03	-12.90	7.27	-9.62	0.99	0.32	-0.47
R <sup>2</sup>	0.97	0.96	0.92	0.98	0.95	1.00	1.00
Ens	0.90	0.70	0.79	0.75	0.94	0.99	1.00

拟黄河源区未来的气候变化。

以上结果表明,利用 SDSM 建立的统计关系很好的模拟了基准期的日降水量和日最高、最低气温,同时也证明了由此生成的未来气候变化情景是比较可靠的。

#### 5.2.4 建立未来气候情景

建立起日降水量和日最高、最低气温的统计降尺度模型后,应用预报量—预报因子间的关系对 HadCM3 GCM 在 B2 情景下的输出数据进行统计降尺度,以建立未来各个时期的气候情景。所有预报因子均采用模型输出的基准期 30 a 的平均值和标准差作了相应的标准化处理。

为定量描述以上模拟结果,本研究同时应用了模型偏差、相关系数( $R^2$ )和 Nash-Sutcliffe 系数(Ens)评价其模拟效果。表 3 列出了黄河源区验证期(1976—1990 年)日降水量和日最高、最低气温统计特征值模拟值与实测值的评价系数。可以看出,SDSM 模型对气温和降水量的模拟效果均比较好。降水量模拟的相关系数均在 0.90 以上,Nash-Sutcliffe 系数也均超过了 0.70。气温模拟的相关系数和 Nash-Sutcliffe 系数甚至达到了 1.0,可见模拟精度满足模拟要求。所以,SDSM 可以很好的模

由于所选择的 GCM 预报因子变量本身存在很大的不确定性,所以,降尺度过程必然会产生一定的误差。因此,严格的统计降尺度模型通常需要研究这种不确定性,以评估由此对未来气候变化带来的影响<sup>[1]</sup>。这对于 HadCM3 GCM 来说显得更加重要,Hulme 等<sup>[22]</sup>曾研究指出,该模型对欧洲西北部的气流代表性很差,因此,模拟的风暴路径通常会发生很大的南偏。本研究通过比较基准期(1961—1990 年)实测资料、NCEP 再分析资料模拟数据和当前时期气候强迫条件下(CCF)HadCM3 B2 情景输出资料经 SDSM 降尺度后的数据来分析 GCM 预报因子变量的潜在误差。如图 5 所示,6 月至 9 月

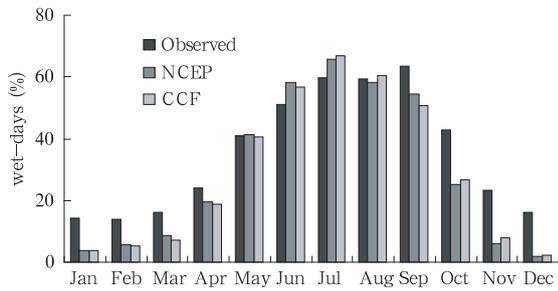


图5 日降水量基准期(1961—1990年)实测数据、NCEP再分析资料和SDSM降尺度CCF模拟值的比较

Fig. 5 Comparison among the observed and downscaled precipitation derived from NCEP and HadCM3 predictors in the headwater catchment of the Yellow River basin in the reference period 1961—1990

间, HadCM3 当前时期的湿日发生概率略小于 NCEP 相应时期的概率(图 5), 月降水量及其方差、平均干/湿日持续期等均表现出相应的变化(图略)。

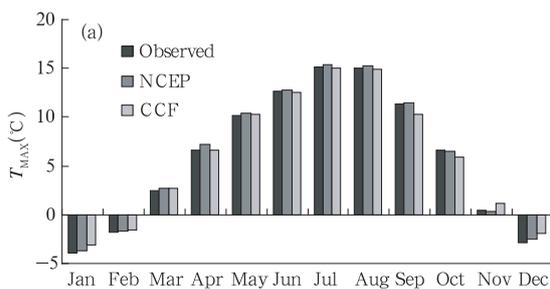


图6 日最高(a)、最低(b)气温基准期(1961—1990年)实测数据、NCEP再分析资料和SDSM降尺度CCF模拟值的比较

Fig. 6 Observed, NCEP modeled, and SDSM downscaled values of daily maximum (a), minimum (b) temperature in the reference period 1961—1990

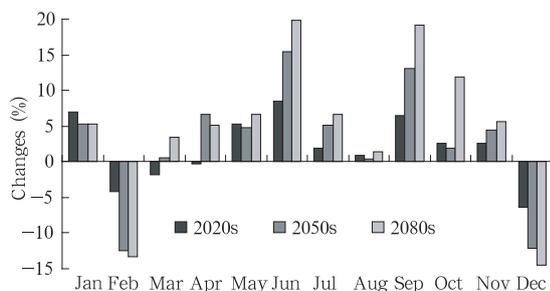
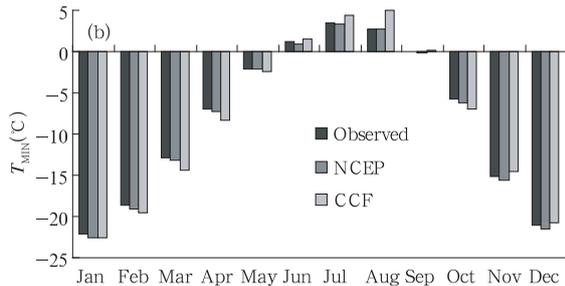


图7 黄河源区未来3个时期的月平均降水量变化比例比较

Fig. 7 Percentage changes (%) in average monthly rainfall in the headwater catchment of the Yellow River basin in the 2020s, 2050s, and 2080s

因此, HadCM3 模拟的夏季降水与 NCEP 模拟值相比稍微偏小。由图 6 可以看出, 4 月至 10 月, HadCM3 当前时期的日最高气温略低于 NCEP 相应时期的模拟值, 而日最低气温则表现出相反的变化特征, 2、3、4 和 10 月 CCF 模拟值略低于 NCEP 的模拟值, 其余 8 个月的 CCF 模拟值均略高于 NCEP 模拟值。

图 7 显示了 SDSM 模拟的黄河源区未来 3 个时期(2020s、2050s、2080s)平均降水量的变化比例。可以看出, 分析各个时期的变化可知, 黄河源区在未来 3 个时期平均降水量以 12 月和 2 月为代表呈现明显的减少趋势, 同时以 6 和 9 月为代表呈现明显的增加趋势, 其余月份变化均较小。分析年平均变化可知, 研究区未来 3 个时期的降水量将分别比基准期增加 3.47%、6.42% 和 8.67%。总之, 未来 3 个时期黄河源区降水量将表现出一定的增加趋势, 但是增幅不显著, 季节变化明显, 其中秋季变化最

大, 冬季次之, 春季和夏季变化较小。

图 8 分别列出了黄河源区未来 3 个时期的月平均日最高、最低气温情景, 3 个时期的平均日最高气温变化分别为 1.34、2.60 和 3.90 °C (图 8a), 表现在每个季节和每个月的变化情景又各不相同, 春季和秋季气温变化最显著。与日最高气温变化相比, 图 8b 显示的日最低气温的变化相对不明显, 3 个时期的平均气温变化情景分别为 0.87、1.49 和 2.27 °C, 夏季和秋季气温变化相对较显著, 冬季变化幅度最小, 甚至在 2020s 的 1 月气温变化情景出现了负值。以上结论说明, 无论对于哪种情景, 黄河源区在未来若干年内的持续增温趋势都是不可避免的。

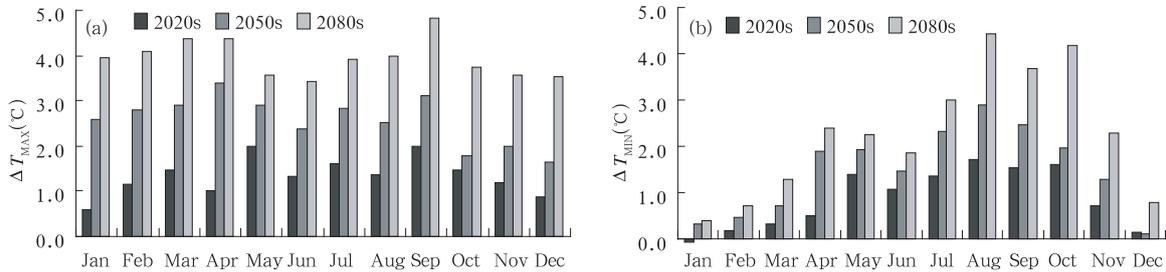


图 8 黄河源区未来 3 个时期的日最高气温(a)和最低气温(b)变化情景

Fig. 8 Scenarios of  $T_{MAX}$  (a) and  $T_{MIN}$  (b) in the headwater catchment of the Yellow River basin in the 2020s, 2050s, and 2080s

### 5.3 降尺度情景比较

Delta 和 SDS 方法均较好的模拟了未来不同时期的降水量和最高、最低气温变化情景(图 2、7 和 8)。由于未来气候变化的不确定性及模型方法本身的局限性,两种方法模拟的气候情景存在一定的差异。比较图 2a 和图 7 可以看出,Delta 方法模拟的降水量变化各季间差异显著,其变幅为  $-15\%$ — $+65\%$ ,而 SDS 方法的模拟结果变化相对不显著,其变幅仅为  $-15\%$ — $+20\%$ 。两种方法模拟的春季和夏季降水量变化存在一定的一致性,大部分变幅低于  $20\%$ ,对于秋季和冬季来说则相差悬殊。比较图 2b 和 8a 可知,Delta 方法和 SDS 方法模拟的日最高气温情景比较一致,3 个时期的气温情景均表现出一定的相似性。而图 2c 和图 8b 的比较结果则表明两种方法对于日最低气温的模拟结果相差较大,除 8—10 月最低气温情景比较一致外,其余月份均差异显著,Delta 方法的模拟结果较高,而 SDS 方法的模拟结果则明显偏低,尤其是冬季最为明显。

研究表明,Delta 和 SDS 方法各有优缺点。相对简单快捷的 Delta 方法在以下几方面表现出相对的优势。首先,Delta 方法可以同时应用多个站点的数据模拟区域气候变化,而 SDS 方法必须分别对每一个站点数据进行降尺度,然后应用内插方法得到区域的平均值。由于各个站点的随机成分及其空间特征存在很大的差异,加上各种内插方法本身亦存在很大的不确定性,因此更加剧了气候情景的不确定性。其次,区域影响研究中,SDS 方法比较费时,并且对数据精度要求较高,所用站点数据必须为日数据,而 Delta 方法可以直接通过 GCMs 输出数据生成未来的气候情景。而 SDS 方法通过选择合适的预报因子变量建立起当地气候变量与大尺度

气候变量间的统计关系,而且经过了严格的模型标定和验证,精度相对较高,因此与 Delta 方法相比优势更加明显,具体表现为:首先,SDS 方法通过生成气候变化集对降尺度情景的不确定性进行分析和评价;其次,Delta 方法假定未来气候的时间结构保持不变,即与基准期气候一致,而 SDS 方法则应用瞬变的 GCMs 产生瞬变的气候情景,因此更加接近实际情况<sup>[1]</sup>。

## 6 结论和讨论

本研究同时应用了 Delta 和 SDS 方法比较分析黄河源区未来不同时期的气候变化情况。Delta 方法借助 HadCM3 GCM 在当前和未来不同时期气候条件的差异,结合当前实测资料,建立未来不同时期的气候变化情景。统计降尺度模型(SDSM)应用站点实测资料和 NCEP 再分析资料建立预报量和预报因子间的统计关系,然后应用 HadCM3 GCM 输出模拟未来不同时期的气候变化情况,建立相应的气候变化情景。由此得出初步结论:

(1) 应用 Delta 方法模拟的降水量出现了不同程度的增加趋势,未来 3 个时期日降水量将在基准期基础上分别增加  $8.75\%$ 、 $19.70\%$  和  $18.49\%$ 。

(2) SDS 法模拟的研究区未来 3 个时期的降水量表现出一定的增加趋势,但是增幅不显著,分别比基准期增加  $3.47\%$ 、 $6.42\%$  和  $8.67\%$ ,季节变化明显,其中秋季变化最大,冬季次之,春季和夏季变化较小。

(3) 应用 Delta 方法模拟的气温变化情景与降水量变化相比,表现出一定的共性,即均随时间推移增幅明显。未来 3 个时期的日最高气温将在基准期基础上分别升高  $1.41$ 、 $2.42$  和  $3.44$  °C,日最低气温

则分别升高 1.49、2.68 和 3.76 °C,未来极值气温变幅减小。

(4) SDS 法模拟的研究区未来 3 个时期的气温变化情景表现出明显的上升趋势,且随时间推移增幅明显,未来 3 个时期的日最高气温分别比基准期升高 1.34、2.60 和 3.90 °C,日最低气温相对较小,3 个时期分别升高 0.87、1.49 和 2.27 °C,由此模拟的未来时期无霜期将延长。

(5) 两种方法的模拟结果表明未来降水量有一定的增加趋势,但是增幅不大,未来日最高、最低气温存在明显的上升趋势,且增幅较大。

综上所述,无论对于哪种情景,黄河源区在未来若干年内的持续增温趋势是不可避免的,而降水量变化幅度相对较小,这必然导致未来水资源的紧张趋势进一步恶化。由于蒸发量的变化尚不确定,因此,需要进一步研究未来各个时期蒸发量的变化,以判断未来增加的降水是否会抵消由于气温升高而增加的蒸发量,进而确定径流量的变化情况,从而为水资源决策部门提供依据和参考。

## 参考文献

- [1] Diaz-Nieto J, Wilby R L. A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: impacts on low flows in the river Thames, United Kingdom. *Clim Change*, 2005, 69: 245-268
- [2] Wilby R L, Dawson C W, Barrow E M. SDSM—A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environ Model Soft*, 2002, 17: 147-159
- [3] Wilby R L, Dawson C W. Using SDSM Version 3.1—A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *User Manual*, 2004: 8
- [4] 范丽军,符淙斌,陈德亮.统计降尺度法对未来气候变化情景预估的研究进展. *地球科学进展*, 2005, 20(3): 320-329
- [5] Cubasch U, Von Storch H, Waszkewitz J, et al. Estimates of climate changes in southern Europe using different downscaling techniques. *Climate Res*, 1996, 7: 129-149
- [6] Risbey J, Stone P. A case study of the adequacy of GCM simulations for input to regional climate change. *J Climate*, 1996, 9: 1441-1467
- [7] IPCC. *Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses*. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 1996
- [8] 李巧萍,丁一汇.区域气候模式对东亚季风和中国降水的多年模拟与性能检验. *气象学报*, 2004, 62(2): 140-153
- [9] 王守荣,黄荣辉,丁一汇.水文模式 DHSVM 与区域气候模式 RegCM2/China 嵌套模拟试验. *气象学报*, 2002, 60(4): 421-427
- [10] Hay L E, Wilby R L, Leavesley G H. A comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States. *J Amer Water Resour Assoc*, 2000, 36(2): 387-397
- [11] Wilby R L, Wigley T M L. Downscaling General Circulation Model output: a review of methods and limitations. *Prog Phys Geography*, 1997, 21: 530-548
- [12] Mearns L O, Bogardi I, Giorgi F, et al. Comparison of climate change scenarios generated from regional climate model experiments and statistical downscaling. *J Geophys Res*, 1999, 104 (D6): 6603-6621
- [13] Palutikof J P, Godess C M, Watkins S J, et al. Generating rainfall and temperature scenarios at multiple sites: examples from the Mediterranean. *J Climate*, 2002, 15: 3529-3548
- [14] Conway D, Wilby R L, Jones P D. Precipitation and air flow indices over the British Isles. *Climate Res*, 1996, 7: 169-183
- [15] Wilby R L, Charles S P, Zorita E, et al. IPCC-TGCM, 2004: Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods. Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment, 2004: 27pp
- [16] 徐影,丁一汇,赵宗慈.近 30 年来人类活动对东亚地区气候变化影响的检测与评估. *应用气象学报*, 2002, 13(5): 513-525
- [17] 施小英,徐祥德,徐影.中国 600 个站气温和 IPCC 模式产品气温的比较. *气象*, 2005, 31(7): 49-53
- [18] Johns T C, Carnell R E, Crossley J F, et al. The second Hadley Centre coupled ocean-atmosphere GCM: Model description, spinup and validation. *Clim Dynam*, 1997, 13: 103-134
- [19] Winkler J A, Palutikof J P, Andresen J A, et al. The simulation of daily temperature time series from GCM output: Part II: Sensitivity analysis of an empirical transfer function methodology. *J Climate*, 1997, 10: 2514-2535
- [20] Wilby R L, Hassan H, Hanaki K. Statistical downscaling of hydrometeorological variables using general circulation model output. *J Hydro*, 1998, 205: 1-19
- [21] Kilsby C G, Cowpertwait P S P, O'Connell P E, et al. Predicting rainfall statistics in England and Wales using atmospheric circulation variables. *Int J Climatol*, 1998, 18: 523-539
- [22] Hulme M, Jenkins G J, Lu X, et al. *Climate Change Scenarios for the United Kingdom: The UKCIP02 Scientific Report*, Tyndall Centre for Climate Change Research, Norwich, UK, 2002

## COMPARATIVE ANALYSIS ON DOWNSCALED CLIMATE SCENARIOS FOR HEADWATER CATCHMENT OF YELLOW RIVER USING SDS AND DELTA METHODS

Zhao Fangfang Xu Zongxue

*Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education,  
College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875*

### Abstract

General circulation models (GCMs) results suggest that the increasing concentration of greenhouse gases will have significant implications for climate on global and regional scales. Less confidence exists on the extent to which meteorological processes will be affected at individual site. The so-called ‘downscaling’ techniques are used to bridge the spatial and temporal resolution gaps between that what the climate modelers are currently able to provide and that what the impact assessors require. Strategic-scale assessments of climate change impacts are often undertaken by using the Delta method where the future climate changes projected by GCMs are applied to the baseline climatology. Alternatively, statistical downscaling (SDS) methods apply climate variables from GCMs to statistical transfer functions to estimate the point-scale meteorological series. The relative merits of the SDS and Delta methods are investigated in this paper by using a case study of scenarios in the headwater catchment of the Yellow River basin under baseline (1961—1990) and climate change conditions (2020s, 2050s and 2080s). The climate change scenarios for daily precipitation and daily maximum/minimum temperature are generated by using the SDS and Delta methods, and the results show that there is a small increasing trend for the precipitation and an obvious increasing trend for the maximum/minimum daily temperature in the study periods. These departures are explained in terms of the different treatment for the multi-decadal natural variability, temporal structure of daily climate variables and large-scale forcing of local precipitation and maximum/minimum temperature by two downscaling methods. Compared with the results in the baseline for Delta scenarios, the changes of precipitation in the future are very big, it will increase 8.75%, 19.70% and 18.49%, respectively; the daily maximum temperature will increase 1.41 °C, 2.42 °C and 3.44 °C in the future, and the daily minimum temperature will increase 1.49 °C, 2.68 °C and 3.76 °C, respectively, which result in reduced temperature ranges in the future. For SDS scenarios modeled in virtue of observed data and NCEP reanalysis data, the changes of precipitation in the future are little, it will increase 3.47%, 6.42% and 8.67% with obvious seasonal characteristics; the temperature shows obviously increasing trend, the changes are +1.34 °C, +2.60 °C and +3.90 °C for daily maximum temperature, and +0.87 °C, +1.49 °C and +2.27 °C for daily minimum temperature, with longer frost-free periods in the future. For the use of downscaling approaches, SDS method has more merits than Delta method, but it also has the inevitable limitation. Given the uncertainties in the GCMs ability to simulate current conditions based on either the Delta or downscaling approaches, future climate assessments based on these approaches must be treated with caution. Therefore, it is necessary to compare different techniques for the evaluation of the impact of the actual climate change, expecting to support guidance for the government.

**Key words:** Climate change, General circulation models (GCMs), Scenario, Downscaling, Yellow River.